

УДК 662.957.8

Н. Б. Лошкарев^{1,2}, Д. Ф. Муксинов¹

¹ ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина», г. Екатеринбург, Россия;

² ОАО «Научно-исследовательский институт металлургической теплотехники» (ОАО «ВНИИМТ»), г. Екатеринбург, Россия

РЕГЕНЕРАТИВНЫЙ ТЕПЛООБМЕННИК С ЖИДКОМЕТАЛЛИЧЕСКИМ ТЕПЛОНОСИТЕЛЕМ

Аннотация

В данной статье приведена разработанная методика расчета регенеративной насадки с жидкометаллическим теплоносителем, в основу которого заложены процессы выделения тепла при кристаллизации и плавлении металлов. Теплота, отдаваемая дымовыми газами, аккумулируется жидкометаллическим теплоносителем, а после смены режима работы передается за счет кристаллизации плавкого ядра насадки. Режим работы насадки ограничен полученным в ходе расчета минимальным временем перекидки одной из секций. После нагрева насадки и расплавления металла во всех секциях регенератора, работающих на просос дымовых газов, происходит перекидка клапанов и смена работы теплообменника на кристаллизационный (воздушный) режим. В этот момент по блоку теплоаккумулирующих элементов продувается холодный воздух и параллельно с этим происходит кристаллизация плавкого ядра (жидкого металла), что сопровождается выделением тепла и соответственно сохранением постоянства температуры подогрева. Благодаря тому, что во время плавления и кристаллизации металла выделяется одинаковое количества теплоты при равенстве температуры обоих процессов, можно определить количество теплоты, которое может отдать воздуху плавкое ядро теплоаккумулирующего элемента. Исходя из полученной тепловой мощности затрачиваемой на нагрев насадки и теплоты необходимой для нагрева воздуха до заданных температур можно определить время перекидки и длину блока. Расчет обосновывает увеличение времени перекидки насадки при постоянстве подогрева воздуха, что положительно скажется на сроке службы теплообменника.

Ключевые слова: регенеративная насадка, скрытая теплота кристаллизации и плавления металлов, методика расчета, геометрические размеры, длина секции, масса плавкого ядра, время перекидки.

Abstract

This article describes the developed technique for calculating a regenerative nozzle with a liquid-metal coolant, which is based on the processes of heat generation during crystallization and melting of metals. The liquid metal coolant accumulates the heat given off by the flue gases, and after changing the operating mode it is transferred due to crystallization of the fusible core of the nozzle. The operating mode of the nozzle is limited by the minimum time of the transfer of one of the sections obtained during the calculation. After heating the nozzle and melting the metal in all sections of the regenerator that operate on the flue gas, the valves are switched and the heat exchanger is changed to the crystallization (air) mode. At this moment, cold air is blown through the unit of heat-storage elements and, in parallel with this, the melting core (liquid metal) crystallizes, which is accompanied by the release of heat and, accordingly, the persistence of the heating temperature. Because during the melting and crystallization of the metal, an equal amount of heat is released at the same temperature of both processes, it is possible to determine the amount of heat that the fusible core of the heat-storage element can give to the air. Based on the received thermal power of the nozzle and heat

necessary for heating the air to the set temperatures, it is possible to determine the time of the overflow and the length of the block. The calculation justifies the increase in the nozzle changeover time with the constant heating of the air, which will positively affect the life of the heat exchanger.

Key words: *regenerative nozzle, latent heat of crystallization and melting of metals, calculation technique, geometric dimensions, section length, weight of fusible core, time of changeover.*

Сегодня на нагревательных печах достаточно успешно применяются регенеративные горелки, в которых проблемы теплоемкости насадки и стабилизации температуры подогрева воздуха для горения решаются не увеличением размеров насадки, а сокращением времени перекидки, которое, для известных зарубежных горелок, составляет примерно 10–15 секунд. Это требует установки на регенеративных горелках быстродействующих электромагнитных клапанов с высоким эксплуатационным ресурсом. При этом размеры насадки оказываются значительными, что увеличивает габариты горелки [1].

Для увеличения теплосодержания насадки в теплообменнике данной конструкции используется скрытая теплота плавления металлического ядра, заключенного в теплопроводящую оболочку. В предлагаемом варианте конструкции насадки регенератора с плавким ядром существенно увеличивается её теплосодержание, за счет скрытой теплоты плавления металлов.

Идея создания регенератора с плавки ядром для увеличения теплосодержания насадки, была выдвинута Ярошенко Ю.Г., Швыдким В.С., Гордоном Я.М. и Советкиным В.Л. [2] еще в 1988 году. Это техническое решение позволяет увеличить время перекидки или уменьшить размеры насадки регенератора, однако температура насадки, а значит и температура подогрева воздуха, в этом случае изменяется в достаточно широких пределах, что негативно сказывается на тепловом режиме работы агрегатов, оборудованных подобными регенераторами.

Работниками ОАО «ВНИИМТ» совместно с сотрудниками кафедры «Теплофизика и информатика в металлургии» Уральского федерального университета им. первого Президента РФ Б.Н. Ельцина разработан компактный регенеративный теплообменник большой теплоемкости, предназначенный для установки на горелках нагревательных и термических печей.

В регенеративной горелке с насадкой, содержащей плавкое ядро, предполагается установить четное количество регенеративных блоков, половина которых работает на нагрев и плавление ядра, а значит и на охлаждение продуктов сгорания, а половина на охлаждение и кристаллизацию плавкого ядра и, следовательно, подогрев воздуха. Каждый блок состоит из десяти последовательно установленных секций, температура плавления теплоносителя отличается в соседних секциях приблизительно на 100 °С. При этом максимальную температуру плавления имеет ядро той секции, которая установлена на выходе продуктов сгорания из рабочего пространства печи, т.е. самой горячей, а минимальную температуру плавления имеет ядро секции, располагающейся на входе холодного воздуха в регенеративный блок.

После нагрева насадки и расплавления металла во всех секциях регенератора, работающих на просос дымовых газов, происходит перекидка клапанов и смена работы теплообменника на кристаллизационный (воздушный) режим. В

этот момент по блоку теплоаккумулирующих элементов продувается холодный воздух и параллельно с этим происходит кристаллизация плавкого ядра (жидкого металла), что сопровождается выделением тепла и соответственно сохранением постоянства температуры подогрева. Для нагрева воздуха используется только удельная теплота кристаллизации. Когда весь расплавленный металл регенератора переходит в твердое состояние, происходит перекидка клапанов и цикл нагрева повторяется. Это не одномоментный процесс, вещество плавится на протяжении какого-то времени (скорость плавления зависит от количества тепла, сообщаемого металлу в единицу времени). Во время плавления тепло продолжает поглощаться, но температура вещества не увеличивается. Когда вещество полностью перейдет в жидкое состояние, то поглощенное им тепло уже снова будет увеличивать его температуру. Именно после этого момента происходит перекидка клапанов и изменение режима работы с нагрева на кристаллизацию.

Секция регенератора с плавким ядром состоит из оболочек, заполненных металлом (рис. 1). Оболочка должна иметь развитую наружную поверхность. Это необходимо для формирования теплового потока, обеспечивающего охлаждение продуктов сгорания на $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ за время прохождения их через секцию, в количестве, образующемся при сжигании газа в горелке, работающей на номинальной мощности.

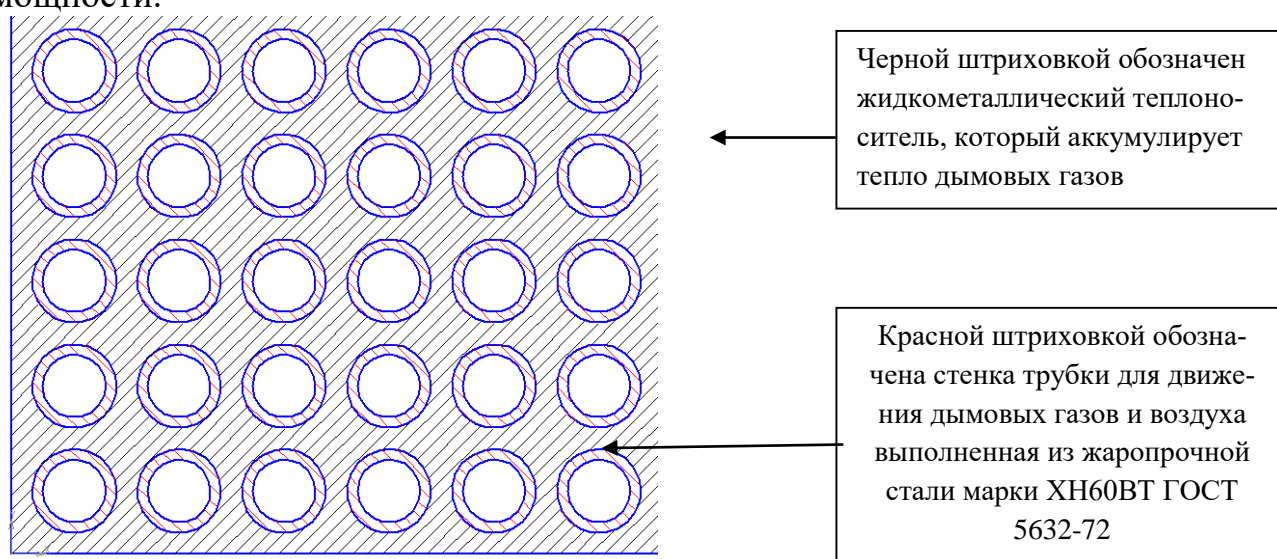


Рис. 1. Теплоаккумулирующая секция

В качестве примера рассмотрим горелку мощностью 200 кВт с расходом природного газа $20\text{ м}^3/\text{ч}$. При этом расход воздуха, теоретически необходимый для сжигания природного газа с теплотой сгорания $Q_{\text{н}}^{\text{р}} = 33500$, составит $L_0 = 9,2$, а при коэффициенте избытка воздуха $\alpha = 1,1$ потребуется $L_{\alpha} = 9,2 \times 1,1 = 10,12\text{ м}^3/\text{м}^3$. Таким образом, общий расход воздуха для сжигания $20\text{ м}^3/\text{ч}$ природного газа составит $V_{\text{в}} = 20 \times 10,12 = 202,4\text{ м}^3/\text{ч}$ (или $0,0562\text{ м}^3/\text{с}$) [3].

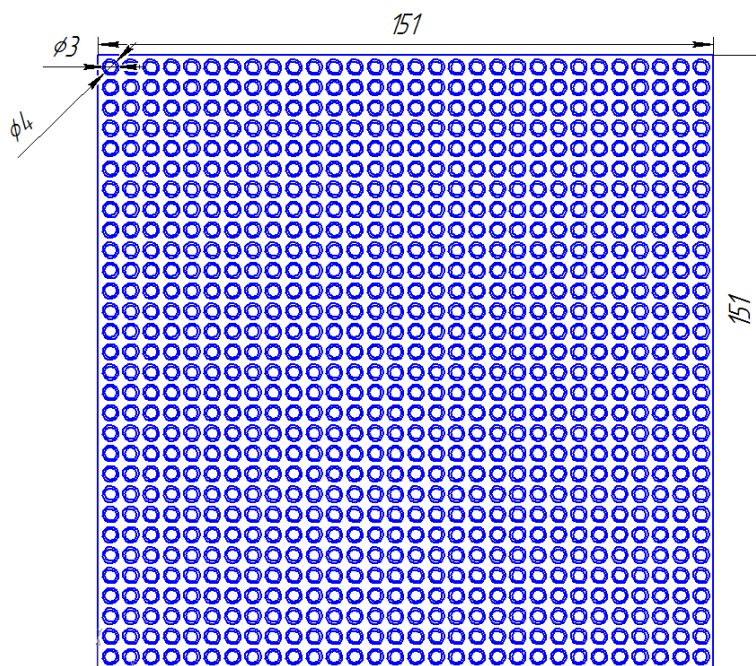


Рис. 2. Теплообменная секция насадки

Примем температуру продуктов сгорания, выходящих из рабочего пространства нагревательной печи – $t_z = 1200\text{ }^{\circ}\text{C}$, а температуру воздуха на входе в регенератор $t'_в = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$.

В данной работе используется конструкция, представляющая собой пучок трубок из нержавеющей, стали с наружным диаметром – $d_n=4\text{ мм}$ и внутренним – $d_v=3\text{ мм}$, которые предназначены для движения дымовых газов и воздуха (рис. 2).

Длина секции (трубки) определяется скрытой теплотой плавления ядра. Теплообменная секция изнутри заполняется плавким материалом, и заваривается по контуру. При этом соседние секции заполняются металлом с температурой плавления, отличающейся приблизительно на $100\text{ }^{\circ}\text{C}$. Десять секций составляют блок регенератора. Всего в одной горелке предполагается разместить четыре регенеративных блока (рис. 3): два из них работают на подогрев воздуха и кристаллизацию ядра, и два на охлаждение продуктов сгорания и нагрев насадки, т.е. расплавление ядра.

При такой компоновке, температуры воздуха и продуктов сгорания, проходящих через регенератор, должны измениться в каждой секции приблизительно на $100\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Секция насадки аккумулирует тепло дымовых газов и передает его нагреваемому воздуху, выполняя тем самым роль посредника в теплообмене между дымом и воздухом, при этом температура насадки не изменяется.

Материал конструкции теплоаккумулирующего элемента должен быть жаропрочным, а также обладать сопротивлением окислению при высоких температурах. В качестве материала труб для движения дымовых газов можно выбрать жаропрочную сталь марки ХН60ВТ ГОСТ 5632–72.

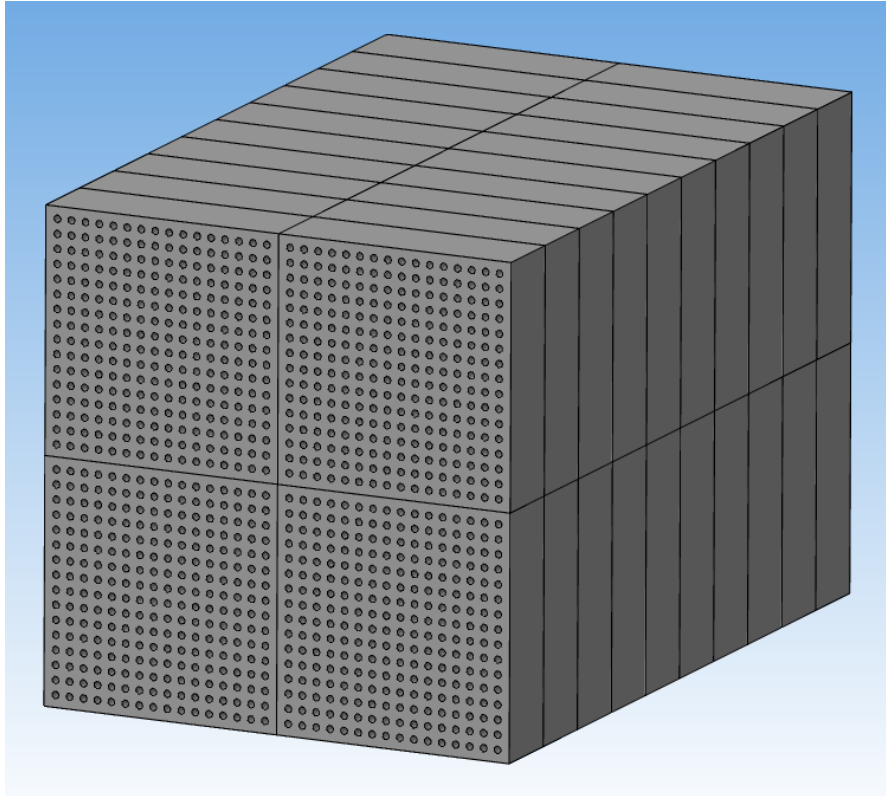


Рис. 3. Регенеративная насадка, состоящая из четырех блоков

Поскольку в каждой секции воздух нагревается на $100\text{ }^{\circ}\text{C}$, а количество секций с разными плавкими ядрами предполагается равным десяти, воздух должен нагреться приблизительно до $1083\text{ }^{\circ}\text{C}$. Поскольку на подачу воздуха будут работать два блока, то через каждый блок расход воздуха составит [3]:

$$202,4/2=101,2\text{ м}^3/\text{ч}\text{ или }V_{\text{в1}}=101,2/3600=0,0281\text{ м}^3/\text{с}.$$

Для подогрева $101,2\text{ м}^3/\text{ч}$ воздуха на $104\text{ }^{\circ}\text{C}$ за время его прохождения через одну секцию, потребуется тепловой поток, который можно определить по уравнению:

$$q = V_{\text{в1}} \times C_{\text{в}} \times \Delta t_{\text{в}} = 0,0281 \times 1015 \times (124 - 20) = 2966,2\text{ Вт}, \quad (1)$$

где $C_{\text{в}}$ – средняя теплоемкость воздуха в интервале изменения температуры его в секции, $\frac{\text{Дж}}{\text{м}^3 \times \text{K}}$;

$\Delta t_{\text{в}}$ – изменение температуры воздуха в первой секции, $^{\circ}\text{C}$;

$C_{\text{в}}=1290$ – теплоемкость воздуха при средней его температуре в первой секции [5], $\frac{\text{Дж}}{\text{м}^3 \times \text{K}}$.

С другой стороны, тепловую мощность, передаваемую поверхностью секции воздуху, можно определить по уравнению теплообмена:

$$q = \alpha \times (\bar{t}_{\text{п}} - \bar{t}_{\text{в}}) \times f\text{ Вт}, \quad (2)$$

где α – коэффициент теплоотдачи от теплообменной поверхности секции к воздуху, $\frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \times \text{K}}$;

$\bar{t}_{\text{п}}$ – средняя температура поверхности секции, $^{\circ}\text{C}$;

$\bar{t}_{\text{в}}$ – средняя температура воздуха в секции, $^{\circ}\text{C}$;

f – площадь теплообменной поверхности секции, м^2 .

Определяем критерий Рейнольдса, который характеризует соотношение сил инерции и сил вязкости в потоке жидкости [2]:

$$Re = \frac{w \times d}{\nu}, \quad (3)$$

где w – скорость движения дымовых газов (задана), $\frac{м}{с}$;

d – диаметр канала для движения дымовых газов ($d=0,003$), $м$;

ν – коэффициент кинематической вязкости воздуха при температуре $124^{\circ}C$ [6], $\frac{м^2}{с}$.

Скорость дымовых газов составляет:

$$w = 10 \frac{м}{с}.$$

Определим критерий Рейнольдса для воздуха:

$$Re = \frac{10 \times 0,003}{24,1 \times 10^{-6}} = 1244,81.$$

Из полученного критерия Рейнольдса находим критерий Нуссельта для дымового канала диаметром 3 мм, который характеризует интенсивность теплообмена на границе «стенка–жидкость» [3]:

$$Nu = 0,021 \times Re^{0,8} \times \epsilon, \quad (4)$$

где ϵ – поправка на гидравлический начальный участок;

$$Nu = 0,021 \times 1244,81^{0,8} \times 1,03 = 6,47.$$

Находим конвективный коэффициент теплоотдачи от стенки трубки к воздуху:

$$\alpha_{1к} = \frac{Nu \times \lambda}{d} \frac{Вт}{м^2 \times K}, \quad (5)$$

где λ – коэффициент теплопроводности в первой по ходу движения воздуха секции при температуре $124^{\circ}C$, $\frac{Вт}{м \times град}$ [5].

$$\alpha_{1к} = \frac{6,47 \times 0,0357}{0,003} = 77,04 \frac{Вт}{м^2 \times K}.$$

Приравняв уравнения 1 и 2, и учитывая при этом потери теплоты в окружающую среду через боковые стенки секции 2%, получим выражение:

$$1,02 \times V_b \times \Delta t_b^1 = \alpha \times (t_n - t_b) \times f, \quad (6)$$

откуда можно найти площадь теплообменной поверхности, необходимой для нагрева воздуха на $104^{\circ}C$, при данных условиях теплообмена. В расчетах приняты температура воздуха на входе – $20^{\circ}C$, температура воздуха на выходе из секции – $124^{\circ}C$ для первой по ходу воздуха секции, в которой температура плавления легкоплавкого сплава (Bi 55 %, Pb 45 %) составляет $124^{\circ}C$:

Исходя из полученной площади найдем теплообменную поверхность одной трубки разделив общую теплообменную площадь на количество каналов:

$$f = \frac{0,299}{900} = 0,0003323 м^2.$$

Длина секции, заполненной легкоплавким сплавом Bi 55 %, Pb 45 %, составит:

$$f = \frac{f}{(2 \times \pi \times R)} = \frac{0,000411}{(2 \times 3,14 \times 0,0015)} = 0,04367 м = 43,67 мм;$$

$$f = \frac{V_B \times C_B \times \Delta t_B}{\alpha \times (\bar{t}_n - \bar{t}_B)} = \frac{0,0281 \times 1015 \times (124 - 20)}{77,04 \times (124 - 20)} = 0,370 \text{ м}^2.$$

Расчет количества теплоты, выделяемого плавким ядром. Благодаря тому, что во время плавления и кристаллизации металла выделяется одинаковое количества теплоты при равенстве температуры обоих процессов, можно определить количество теплоты, которое может отдать воздуху плавкое ядро теплоаккумулирующего элемента.

Для определения времени перекидки для каждой секции необходимо найти объем занимаемые плавким ядром, который будет равен:

$$V = V_{\text{общ}} - (V_{\text{д.к.}} \times n), \text{ м}^3, \quad (7)$$

где $V_{\text{общ}}$ – общий объём секции, м^3 ;

$V_{\text{д.к.}}$ – объём, вытесняемый трубками для дымовых газов с учётом внешнего диаметра, м^3 ;

n – количество трубок, шт.

$$V = (0,151 \times 0,151 \times 0,043671) - (3,14 \times 0,0015^2 \times 0,043671 \times 900) = 0,00057997 \text{ м}^3.$$

Исходя из общего объема, занимаемого металлом, найдем массу плавкого ядра теплоаккумулирующей секции.

$$M_1 = 0,00057997 \times 8500 = 4,93 \text{ кг.}$$

Количество теплоты, которое может забрать воздух у плавкого ядра (легкоплавкий сплав Вi 55 %, Рb 45 %) теплоаккумулирующего элемента:

$$Q_{\text{ядра}} = M_1 \times \lambda_{\text{пл}} \text{ Дж, где } \lambda_{\text{пл}} - \text{удельная теплота плавления металла, } \frac{\text{Дж}}{\text{кг}} [5];$$

M_1 – масса плавкого ядра, кг.

Количество теплоты, которое способно выделить плавкое ядро теплоаккумулирующего элемента:

$$Q_{1\text{ядра}} = 4,93 \times 45730 = 225437 \text{ Дж.}$$

В плавком ядре теплота переносится путём молекулярной теплопроводности теплоносителя. Жидкометаллические теплоносители обладают лучшей по сравнению с другими теплоносителями молекулярной теплопроводностью. Это определяет большую долю тепла, переносимого за счёт теплопроводности, и обеспечивает лучшие теплопередающие свойства жидких металлов.

Время плавления металла в секции можно рассчитать, зная необходимое количество теплоты для плавления заданной массы плавкого ядра и тепло, получаемое жидкометаллическим теплоносителем. Не была учтена теплопроводность и толщина стенки трубки для дымовых газов, а соответственно не был рассчитан коэффициент теплопередачи, предполагая, что практически вся теплота дымовых газов должна передаться плавкому ядру теплоаккумулирующего элемента, в силу хорошей теплопроводности и малой толщины стенки ($\delta = 0,0005 \text{ м}$).

Исходя из этого время плавления металла:

$$\tau = \frac{Q_{1\text{ядра}}}{q} \text{ с,} \quad (9)$$

где $Q_{2\text{ядра}}$ – количество теплоты, которое может отдать плавкое ядро воздуху, Дж; q – тепловой поток, необходимый для подогрева $101,2 \text{ м}^3/\text{ч}$ воздуха на 104°C за время его прохождения через одну секцию:

$$\tau = \frac{225437}{2395} = 94 \text{ с.}$$

Аналогичным образом можно рассчитать время перекидки и длину второй и последующих секций с плавким ядром. Результаты этих расчетов представлены в таблице.

Таблица

Результаты расчетов регенеративной насадки с плавким ядром

Металл или сплав	Температура плавления t, °С	Удельная теплота плавления $\lambda, \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$	Плотность $\rho, \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$	Масса плавкого ядра, кг	Длина секции, мм	Время перекидки, с
Легкоплавкий сплав Вi 55%, Рb 45%	124	45,73	8500	4,93	35,27	94
Олово	231,9	59	6834	3,706	32,98	85
Свинец	327,5	24,3	10510	5,475	31,68	59
Цинк	419,5	112,2	7135	6,243	53,21	324
Силумин АК 12 (литейный сплав алюминия с кремнием)	550	364,36	2650	2,952	67,75	313
Алюминий	660	393	2380	2,8	71,55	386
АСМ (алюминиевый антифрикционный сплав)	750	382,84	2830	3,423	73,56	581
МЛ 11 (магниево-литейный сплав)	843	350,22	1800	2,356	79,59	345
Бронза БрБ2	955°С	209,44	8920	13,02	88,75	894
Медь	1083°С	213	8930	14,524	98,92	851
				$\Sigma 59,429$ кг	$\Sigma 633$ мм	Min 59 с

Были определены коэффициенты теплоотдачи плавкого ядра, которые не были приведены в виду того, что они не имеют большого значения для расчета геометрических размеров насадки. Коэффициент теплоотдачи от жидкометаллического теплоносителя к стенке. Коэффициент теплоотдачи от дымовых газов к внутренней стороне стенки намного порядков меньше теплоотдачи жидкого металла к внешней поверхности. Исходя из этого, можно сделать вывод, что коэффициент теплоотдачи от дыма к стенке будет являться основным фактором, определяющим интенсивность теплообмена между дымовыми газами и воздухом.

Поэтому при расчете теплового потока не учитывался коэффициент теплопередачи.

Теплоотдача жидкого металла может затрудняться из-за образования прослойки дополнительной фазы (примеси, окислы) на границе раздела «жидкий металл – стенка». Достоинством теплоносителей из жидкого металла является то, что они имеют высокую теплопроводность, малую вязкость и высокую температуру кипения. Благодаря высокой теплопроводности жидкие металлы могут очень интенсивно забирать теплоту от поверхности нагрева.

Время плавления теплоаккумулирующей секции, заполненной свинцом, составляет 59 секунд, исходя из этого, можно сделать заключение, что данная величина будет определяющей общее время перекидки всей насадки, так как является наименьшим из всех имеющихся секций насадки. Для увеличения времени перекидки необходимо изменить теплоноситель с той же либо схожей температурой плавления, более высокой теплоемкостью и теплопроводностью при температуре плавления, что существенно скажется на увеличении времени перекидки. Однако, основываясь на данный расчет можно прийти к выводу, что существенно уменьшить размеры теплообменника не удалось, ввиду использования данного типа конструкции.

Список использованных источников

1. Тихонов Б.А., Гордон Я.М. Гурашвили В.А., Ярошенко Ю.Г., Раева М.А. Особенности тепловой работы компактных слоевых регенераторов // Известия ВУЗов. Черн. Метал. 1984. № 6. С. 108-110.
2. Регенеративный теплообменник. А.с. СССР №1 366 791. Гордон Я.М., Швыдкий В.С., Советкин В.Л., Ярошенко Ю.Г. Опубл. в Б.И. 1988, №2.
3. Теплообменный блок для регенеративной горелки / Г.М. Дружинин, Н.Б. Лошкарёв, А.Н. Лошкарёв, А.Х. Мухамадиева, Д.Ф. Муксинов // Известия вузов. Черная металлургия. 2017. Т. 60. № 8. С. 643–651.
4. Михеев М.А. Основы теплопередачи / М.А. Михеев, И.М. Михеева. – изд. 2-е, стереотип. – М.: Энергия, 1977. – 344 с.
5. Советкин В.Л. Теплофизические свойства веществ / В.Л. Советкин, Л.А. Федяева, А.С. Телегин. – Екатеринбург: УПИ, 1990. – 101 с.
6. Излучение газов [Электронный ресурс]. – режим доступа: <http://www.rosteplo.ru/w/Излучение> – Заглавие с экрана. – (Дата обращения 20.04.2018).